DOI:10.11931/guihaia.gxzw201807024

LED 不同光强对油茶苗生理生化特性的影响

龚洪恩[1,2]，姚小华[2]，吴鹏飞[2]，王开良[2]，叶思诚[2]，程贵文[1]

（1.中国林业科学研究院亚热带林业实验中心，江西 分宜 336600；2.中国林业科学研究院亚热带林业研究所，浙江 富阳 311400）

摘要：为了给油茶苗培育提供有益参考和科学依据，该论文以两年生长林 4 号油茶扦插苗为试材，测定和分析 LED 红蓝 1∶9 复合光不同光强处理下油茶苗可溶性物质含量、内源激素水平及抗氧化酶活性，探索了 LED 不同光强处理下油茶苗生理生化特性的差异及变化规律。结果表明：100 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理下油茶苗具有最高的 ZR 含量和 POD 活性，以及最低的 MDA 含量，但可溶性糖含量、IAA 含量和 GA 含量最低；150 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理下油茶苗具有最高的 ABA 含量，且可溶性蛋白含量和 SOD 活性最低；200 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理下油茶苗具有最高的 SOD 活性，但 POD 活性最低，且 MDA 含量最高；250 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理下油茶苗具有最高的可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、游离氨基酸含量、IAA 含量、GA 含量和 CAT 活性；300 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理下油茶苗游离氨基酸含量、ABA 含量、ZR 含量和 CAT 活性均最低。与其他处理相比，250 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理更利于提高长林 4 号油茶苗各项生理生化指标，是培育油茶苗较为理想的光强。

关键词：经济林学，育苗，可溶性物质，内源激素，抗氧化酶

中图分类号：S722.3　　　　**文献标识码：**A

Effects of different LED intensity on the physiological and biochemical characteristics of oil-tea camellia seedlings

GONG Hongen[1,2], YAO Xiaohua[2], WU Pengfei[2], WANG Kailiang[2], YE Sicheng[2], CHENG Guiwen[1]

(1.*The Experimental Centre of Subtropical Forestry*, *CAF*, Fenyi Jiangxi 336600, China; 2.*Research Institute of Subtropical Forestry*, *CAF*, Fuyang Zhejiang 311400, China)

Abstract: In order to provide a beneficial reference and scientific basis for the cultivation of oil-tea camellia seedlings, the soluble matter content, endogenous hormone level and antioxidant enzymes activity of oil-tea camellia seedlings treated with different light intensity of LED composite light (10% red lights + 90% blue lights) were measured and analyzed, and the difference and change rules of physiological and biochemical characteristics of oil-tea camellia seedlings under different LED light intensity was explored, taking two-years-old cutting seedlings of ‘Changlin-4’ *C. oleifera* as test materials. The results showed that: Under the light intensity of 100 μmol·m^{-2}·s^{-1}, the ZR content and POD activity of oil-tea camellia seedlings were the highest, and the MDA content was the lowest, but the content of soluble sugar, IAA and GA were also the lowest; Under the light intensity of 150 μmol·m^{-2}·s^{-1}, the ABA content of oil-tea camellia seedlings was the highest, furthermore, the soluble protein content and the SOD activity were the lowest; Under the light intensity of 200 μmol·m^{-2}·s^{-1}, the SOD activity of oil-tea camellia seedlings was the highest, but the POD activity was the lowest, furthermore, the MDA content was the highest; Under the light intensity of 250 μmol·m^{-2}·s^{-1}, the soluble protein content, soluble sugar content, free amino acid content, IAA content, GA content and CAT activity of oil-tea camellia seedlings were all the highest; Under the light intensity of 300 μmol·m^{-2}·s^{-1}, the free amino acid content, ABA content, ZR content and CAT activity of oil-tea camellia seedlings were all the lowest. Compared with other treatments, 250

基金项目：中国林业科学研究院基金重点项目（CAFYBB2017ZA004-1）；浙江省农业新品种选育重大科技专项（2016C02056-6）；中国林业科学研究院亚热带林业研究所项目（RISFZ-2016-03）[Supported by the Key Projects of the CAF Fund(CAFYBB2017ZA004-1); Major Scientific and Technological Program of Zhejiang for Agriculture New Varieties Breeding(2016C02056-6); Project of Research Institute of Subtropical Forestry, CAF(RISFZ-2016-03)]。

作者简介：龚洪恩（1981—），男，河南夏邑人，博士，工程师，主要从事油茶良种选育及繁育栽培研究。E-mail：gonghongen1981@163.com。

通讯作者：姚小华，博士，研究员，主要从事经济林遗传育种和栽培研究。E-mail：yaoxh168@163.com。

$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ LED composite light (10% red lights + 90% blue lights), which is more conducive to improve the physiological and biochemical indexes of ‘Changlin-4’ *C. oleifera* seedlings, is the ideal light intensity to cultivate seedlings of oil-tea camellia.

Key words: Nonwood forest science, seedling, soluble matter, endogenous hormone, antioxidant enzyme

光强是植物生长发育过程中重要的环境因子之一，对植物的生长发育（Zavala & Ravetta, 2001）、光合特性（Rezai et al., 2018）、生理代谢（Higashiuchi et al., 2016）、品质形成（Li et al., 2016）等具有重要的影响。植物只有在合适的光强下才能更好的生长，光强过弱，植物会出现徒长、叶片变大、变薄等不良症状（战吉宬等，2003）；光强过强，植物则会出现萎蔫、叶片变小、变厚等不良症状（Matos et al., 2009）。光照过强或过弱都会产生光抑制，但植物在长期的进化过程中也形成了一系列保护机制，如活性氧清除系统，在一定范围内能及时清除活性氧，减少活性氧对细胞的伤害（种培芳和陈年来，2008）。

油茶（*Camellia oleifera* Abel.）是我国南方地区重要的木本油料树种，也是世界四大木本油料之一，广泛分布于我国南方地区，其最主要产品茶油含有丰富的不饱和脂肪酸和维生素 E，被誉为“东方橄榄油”（庄瑞林等，2012）。近年来，国家对油茶产业的发展越来越重视，相继出台了各种优惠政策和补贴措施，油茶种植面积不断扩大，苗木需求日益增加，良种苗木已无法满足市场需求。为寻找提高油茶育苗效率的途径，本课题组首先探索了 LED 光质对油茶苗生长的影响，并筛选出了适合‘长林 4 号’油茶苗培育的最佳光质配比（姚小华等，2015；龚洪恩等，2018）。本研究是在前期研究的基础上，以 LED 红蓝 1∶9 复合光为光源，研究 LED 不同光强对‘长林 4 号’油茶扦插苗可溶性物质含量、内源激素水平和抗氧化酶活性变化的影响，以期为油茶育苗光强的选择提供有益参考和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2017 年 4 月-6 月在中国林科院亚热带林业研究所进行。从浙江省江山市林业种苗良种繁育中心选取生长健壮且长势基本一致的两年生长林 4 号油茶扦插苗（苗高约 13.9 cm，地径约 2.57 mm）为试验材料，单株移栽到装有育苗基质（德国进口 K 牌泥炭土）的塑料盆（口径 14 cm×高 11 cm）中，每个处理 36 株，重复 3 次，做好本底调查（苗高和地径）。4 月 4 日开始进行光照处理。LED 灯条购于深圳立波照明有限公司，参数为红光 LED 峰值波长 661 nm，半宽度 19.7 nm，色纯度 0.993，蓝光 LED 峰值波长 454 nm，半宽度 20.1 nm，色纯度 0.982。以 LED 红蓝 1∶9 复合光为光源，设置 L1（100 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）、L2（150 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）、L3（200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）、L4（250 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）和 L5（300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）5 种不同光强进行处理。培养架为钢架结构，外置黑色遮光布，光源置于植株上方，且植株与光源间距离可调，光照时间均为 12 $h \cdot d^{-1}$（6:30-18:30），室温控制在 25±1 ℃。培养到第 60 d（6 月 3 日）时进行相关指标的测定。

1.2 指标测定

各处理随机选取 12 株（每重复 4 株），选择植株顶叶起第 2～3 片叶，擦拭干净，剪成细丝，用万分之一天平称取 0.1 g 装入 2 ml 冷冻离心管并迅速放入液氮中，然后转入-80 ℃冰箱保存备用。

植物可溶性蛋白含量、游离氨基酸含量、可溶性糖含量、MDA（丙二醛）含量、SOD（超氧化物歧化酶）活性、POD（过氧化物酶）活性和 CAT（过氧化氢酶）活性均使用科铭生物技术有限公司（苏州，中国）提供的试剂盒进行测定，所采用的试剂盒分别为考马斯亮蓝法蛋白含量测定试剂盒（KMSP-2-W）、氨基酸（AA）含量测定试剂盒（AA-2-W）、植物可溶性糖含量试剂盒（KT-2-Y）、MDA 试剂盒（MDA-2-Y）、SOD 试剂盒（SOD-2-Y）、POD 试剂盒（POD-2-Y）和 CAT 试剂盒（CAT-2-Y），具体操作和结果计算参照试剂盒提供说明进行。

内源激素 IAA（吲哚乙酸）、GA（赤霉素）、ABA（脱落酸）和 ZR（玉米素核苷）含量采用 ELISA 法测定，该部分工作委托中国农业大学完成。

1.3 数据处理

每个处理每个重复均随机取样 3 次，采用 Excel 2007 和 SPSS 11.5 软件对数据进行统计分析。采用单

因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 LED 不同光强对油茶苗叶片可溶性物质含量的影响

LED 不同光强处理下油茶苗叶片的可溶性蛋白含量随光强的提升表现为降-升-降的变化趋势；L4 处理下油茶苗叶片可溶性蛋白含量最大，达 5.058 mg·g^{-1}，显著大于 L2 和 L5 处理；L2 处理最小，但与 L1、L3 和 L5 处理差异不显著（表 1）。

LED 不同光强处理下油茶苗叶片的可溶性糖含量差异不显著，L4 处理下最大，L1 处理下最小（表 1）。

随着 LED 光强的提升，油茶苗叶片的游离氨基酸含量总体表现为先升高后降低的变化趋势；L5 处理下油茶苗叶片游离氨基酸含量最低，为 12.131 mg·g^{-1}，显著低于其他处理；L4 处理下最高，为 L5 处理的 1.35 倍；L1~L4 处理间差异不显著（表 1）。

LED 不同光强处理下油茶苗叶片 MDA 含量总体表现为先升高后降低的变化趋势；L1 处理下油茶苗叶片 MDA 含量最低，为 25.518 nmol·g^{-1}，显著低于其他处理；L3 处理下最高，其次为 L2 处理，然后是 L4 和 L5 处理（表 1）。

表 1　LED 不同光强对油茶苗叶片可溶性物质含量的影响

Table 1　Effects of different LED light intensity on soluble matter content in leaves of oil-tea camellia

处理 Treatment	可溶性蛋白 Soluble protein/(mg·g^{-1})	可溶性糖 Soluble sugar/(mg·g^{-1})	游离氨基酸 Free amino acid/(mg·g^{-1})	丙二醛 MDA/(nmol·g^{-1})
L1	4.724ab	17.862a	14.472a	25.518c
L2	4.469b	20.232a	14.857a	31.483a
L3	4.696ab	19.025a	15.765a	31.524a
L4	5.058a	20.922a	16.341a	30.161ab
L5	4.550b	18.894a	12.131b	27.088ab

注：不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下同。

Note: Different small letters mean significant difference at 0. 05 level. The same below.

2.2 LED 不同光强对油茶苗叶片内源激素含量的影响

LED 不同光强处理下油茶苗叶片的 IAA 和 GA 含量均随光强的提升总体表现出先升高后降低的变化趋势；L4 处理下油茶苗叶片的 IAA 和 GA 含量最高，分别为 56.637 和 7.967 ng·g^{-1}，显著高于其他处理；其次是 L5 和 L3 处理，显著高于 L1 和 L2 处理；L1 处理最低，分别为 41.475 和 5.454 ng·g^{-1}，与 L2 处理差异不显著（表 2）。

LED 不同光强处理下油茶苗叶片的 ABA 含量随光强的提升也总体表现出先升高后降低的变化趋势；L2 处理下油茶苗叶片的 ABA 含量最高，为 77.789 ng·g^{-1}，L1 处理次之，显著高于其他处理；其次是 L3 和 L4 处理，显著高于 L5 处理（表 2）。

LED 不同光强处理下油茶苗叶片的 ZR 含量随光强的提升总体表现出逐渐降低的变化趋势；L1 处理下油茶苗叶片的 ZR 含量最高，为 8.006 ng·g^{-1}，显著高于 L5 处理；L2~L4 处理间差异不显著（表 2）。

表 2　LED 不同光强对油茶苗叶片内源激素水平的影响

Table 2　Effects of different LED liht quality on endogenous hormone level in leaves of oil-tea camellia

处理 Treatment	生长素 IAA/(ng·g^{-1})	赤霉素 GA/(ng·g^{-1})	脱落酸 ABA/(ng·g^{-1})	玉米素核苷 ZR/(ng·g^{-1})

L1	41.475c	5.454a	73.493c	8.006a
L2	42.599c	5.670a	77.789c	6.457ab
L3	51.390b	6.655b	68.246b	6.633ab
L4	56.637a	7.967b	63.044a	6.745ab
L5	52.289b	6.643c	57.292b	5.888b

2.3 LED 不同光强对油茶苗叶片抗氧化酶活性的影响

LED不同光强处理下油茶苗叶片的抗氧化酶活性均随光强的提升总体呈现降-升-降的变化趋势（表3）。

L3 处理下油茶苗叶片的 SOD 活性最大，达 470.202 U·g^{-1}，其次为 L1 和 L4 处理，显著高于 L2 和 L5 处理；L2 处理最低，与 L5 处理差异不显著。

LED 不同光强处理下油茶苗叶片的 POD 活性差异不显著，L1 处理下最高，L3 处理下最低。

L4 处理下油茶叶片的 CAT 活性最大，为 425.192 U·g^{-1}，显著高于其他处理，是 L5 处理的 1.75 倍；L5 处理最低，与 L1、L2、L3 处理差异不显著。

表 3　LED 不同光强对油茶苗叶片抗氧化酶活性的影响

Table 3　Effects of different LED light intensity on antioxidant enzyme activity in leaves of oil-tea camellia

处理 Treatment	超氧化物歧化酶 SOD/(U·g^{-1})	过氧化物酶 POD/(U·g^{-1})	过氧化氢酶 CAT/(U·g^{-1})
L1	463.684a	32.508a	281.962b
L2	376.174b	29.171a	277.120b
L3	470.202a	29.126a	316.672b
L4	450.083a	31.872a	425.192a
L5	396.827b	29.777a	243.443b

3 讨论

（1）LED 不同光强对油茶苗可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

可溶性蛋白是植物体重要的生理生化指标之一，与植物的抗性密切相关（尚文倩等，2013）。本研究发现，‘长林 4 号’油茶苗叶片可溶性蛋白含量在 100~300 μmol·m^{-2}·s^{-1} 光强范围内随光强的提升总体表现为先升高后降低的变化趋势，在 250 μmol·m^{-2}·s^{-1} 光强处理下最大，说明在一定光强范围内适当提高光强能够促进‘长林 4 号’油茶苗叶片可溶性蛋白的积累，与尚文倩等（2017）对金娃娃萱草（*Hemerocallis* cv.）及林魁等（2017）对瓠瓜[*Lagenaria siceraria* (Molina) Standl.]的研究结果一致。

可溶性糖是植物体内一类重要有机成分，对植物的生长发育具有重要的作用（王嘉佳和唐中华，2014）。本研究发现，‘长林 4 号’油茶苗叶片可溶性糖含量在 100~300 μmol·m^{-2}·s^{-1} 光强范围内也随光强的提升总体表现为先升高后降低的变化趋势，在 250 μmol·m^{-2}·s^{-1} 光强处理下最大，说明在一定光强范围内适当提高光强能够提高‘长林 4 号’油茶苗叶片可溶性糖含量，与林魁等（2017）对瓠瓜、丑敏霞等（2000）对金钗石斛（*Dendrobium nobile* Lindl.）、郭子霞等（2011）对白掌[*Spathiphyllum kochii* Engl. & K.Krause]及王志敏等（2011）对叶用莴苣（*Lactuca sativa* L.）的研究结果一致。

（2）LED 不同光强对油茶苗抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响

SOD、POD 和 CAT 是植物体内重要的抗氧化酶，能够不断清除植物在新陈代谢及胁迫过程中产生的活性氧，避免植物膜脂过氧化，对质膜系统造成伤害，进而影响植物的生长发育（Foyer et al., 2016；秦健

等，2017）。但是抗氧化酶很难清除所有的活性氧，随着活性氧的不断积累，植物膜脂过氧化程度就会逐渐提高（李璇等，2013；王立丰等，2014）。MDA 是反应植物膜脂过氧化程度最常用的指标，MDA 含量的大小反映了膜脂过氧化程度的高低（晁天彩等，2013；刘晓英等 2015）。本研究发现，在 100 μmol·m^{-2}·s^{-1} 光强下，‘长林 4 号’油茶苗 SOD、POD 和 CAT 活性较高，MDA 含量最低，说明抗氧化酶能够很好的清除植物体内的活性氧，膜脂过氧化程度较低；在 150 μmol·m^{-2}·s^{-1} 光强下，‘长林 4 号’油茶苗 SOD、POD 和 CAT 活性较低，MDA 含量最高，说明抗氧化酶没能够很好的清除植物体内的活性氧，膜脂过氧化程度较高；随着光强的提升，‘长林 4 号’油茶苗 SOD、POD 和 CAT 活性先升高后降低，而 MDA 含量逐渐降低，说明随着光强的不断提升，植物体内活性氧的产生与清除达到一个动态平衡，膜结构和功能逐渐趋于稳定（芦站根等，2003；晁天彩等，2013）。

（3）LED 不同光强对油茶苗内源激素含量的影响

LED 不同光强处理下‘长林 4 号’油茶苗叶片 IAA 和 GA 含量随光强的提升总体呈现先升高后降低的变化趋势，250 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理下最高，100 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理下最低，而 ABA 含量则随光强的提升总体呈逐渐降低的变化趋势，100 和 150 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理下较高，300 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理下最低。由于 IAA 和 GA 是促进植物生长的激素，而 ABA 则与植物的衰老有关，说明 250 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理能够促进油茶苗的生长，而 100 和 150 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处理不利于油茶苗的生长。研究结果与黄丽娜（2014）对蝴蝶兰的研究结果一致。

4 结论

与其他处理相比，LED 红蓝 1∶9 复合光 250 μmol·m^{-2}·s^{-1} 光强处理的‘长林 4 号’油茶苗具有最大的可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、游离氨基酸含量、IAA 含量、GA 含量和 CAT 活性，SOD 和 POD 活性也较高，且 ABA 含量和 MDA 含量较低。说明 LED 红蓝 1∶9 复合光 250 μmol·m^{-2}·s^{-1} 光强能够提高长林 4 号油茶苗的生理机能，促进内源生长激素的积累，增强其抗性能力，是油茶苗培育比较合适的光照条件。

参考文献：

CHAO TC, ZHOU SB, CHANG LL, et al, 2013. Effects of light intensity on the leaf morphology and physiological parameters of *Boea clarkeana*[J]. Chin J Ecol, 32(5): 1161-1167. [晁天彩，周守标，常琳琳，等，2013. 光照强度对大花旋蒴苣苔叶形态和生理指标的影响[J]. 生态学杂志，32（5）：1161-1167.]

CHOU MX, ZHU LQ, ZHANGYJ, et al, 2000. Effect of light intensity on the growth and metabolism of *Dendrobium nobile* Lindl.[J]. Acta Hort Sin, 27(5): 380-382. [丑敏霞，朱利泉，张玉进，等，2000. 光照强度对石斛生长与代谢的影响[J]. 园艺学报，27（5）：380-382.]

FOYER CH, DESCOURVIERES P, KUNERT KJ, 1994. Protection against oxygen radicals: an important defence mechanism studied in transgenic plants[J]. Plant Cell Environ, 17(5): 507-523.

GONG H, DING YF, YAO XH, et al, 2018. Effects of light qualities on growth and photosynthetic characteristics of *Camellia oleifera* cutting stocks[J]. For Res, 31(2): 176-182. [龚洪恩，丁怡飞，姚小华，等，2018. LED 光质对油茶苗生长和光合特性的影响[J]. 林业科学研究，31（2）：176-182.]

GUO ZX, SHANG WQ, YAN XF, et al, 2011. Effect of light intensity on growth of *Spathiphyllum* plantlets *in vitro*[J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis(Nat Sci Ed), 33(6): 1134-1138. [郭子霞，尚文倩，闫新房，等，2011. 光照强度对白掌试管苗生长的影响[J]. 江西农业大学学报(自然科学版)，33（6）：1134-1138.]

HIGASHIUCHI K, UNO Y, KUROKI S, et al, 2016. Effect of light intensity and light/dark period on iridoids in *Hedyotis diffusa*[J]. Environ Contr Biol, 54(2): 109-116.

HUANG LN, 2014. The physiological responses of different light intensity to *Phalaenopsis* growth and flowering[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University: 37-40. [黄丽娜，2014. 不同光强下蝴蝶兰的若干生理响应[D]. 福州：福建农林大学：37-40.]

LI A, LI S, WU X, et al, 2016. Effect of light intensity on leaf photosynthetic characteristics and accumulation of flavonoids in *Lithocarpus litseifolius* (Hance) Chun. (Fagaceae)[J]. OJF, 6(5): 445-459.

LI X, YUE H, WANG S, et al, 2013. Research of different effects on activity of plant antioxidant enzymes[J]. Chin J Chin Mat, 38(7): 973-978. [李璇，岳红，王升，等，2013. 影响植物抗氧化酶活性的因素及其研究热点和现状[J]. 中国中药杂志，38（7）：973-978.]

LIN K, HUANG Z, LIN BY, et al, 2017. Effects of light intensity and the ratio of red to blue light on growth and some physiological and biochemical indices of *Lagenaria siceraria* (Molina) Standl.[J] Acta Bot Bor-Occid Sin, 37(3): 517-525. [林魁，黄枝，林碧英，等，2017. 光强和红蓝光配比对瓠瓜幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 西北植物学报，37（3）：517-525.]

LIU XY, JIAO XL, XU ZG, et al, 2015. Effects of different red and blue LED light intensity on growth and antioxidant enzyme activity of cherry tomato seedlings[J]. J Nanjing Agric Univ, 38(5): 772-779. [刘晓英，焦学磊，徐志刚，等，2015. 不同红蓝LED 光照强度对樱桃番茄幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 南京农业大学学报，38（5）：772-779.]

LU ZG, ZHAO CQ, ZHOU WJ, et al, 2003. Effect of different light intensity on metabolizing of membrane and inner protective system of *Taxus Media* cv. Hicksii leaves[J]. J Chongqing Univ(Nat Sci Ed), 26(8): 89-92. [芦站根，赵昌琼，周文杰，等，2003. 光强对曼地亚红豆杉膜代谢及保护系统的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版)，26（8）：89-92.]

MATOS FS, WOLFGRAMM R, CAVATTE PC, et al, 2009. Phenotypic plasticity in response to light in the coffee tree[J]. Environ Exp Bot, 67(2): 421-427.

QIN J, LIU Y, FANG SZ, et al, 2017. Effects of light quality and intensity on growth and antioxidative activities of *Cyclocarya paliurus* seedlings[J]. J Nanjing For Univ(Nat Sci Ed), 41(4): 13-18. [秦健，刘洋，方升佐，等，2017. 光质和光强对青钱柳生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，41（4）：13-18.]

REZAI S, ETEMADI N, NIKBAKHT A, et al, 2018. Effect of light intensity on leaf morphology, photosynthetic capacity, and chlorophyll content in sage (*Salvia officinalis* L.)[J]. Korean J Hort Sci Tech, 36(1): 46-57.

SHANG WQ, WANG Z, HE SL, et al, 2017. Effects of light quality ratio and intensity of red/blue light on growth of *Hemerocallis middendorfii* plantlets *in vitro*[J] J Northwest Sci-Tech Univ Agric For(Nat Sci Ed), 45(7): 90-96. [尚文倩，王政，何松林，等，2017. 不同红蓝光质比和光照强度对金娃娃萱草试管苗生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报：自然科学版，45（7）：90-96.]

SHANG WQ, WANG Z, HOU JN, et al, 2013. Effects of light emitting diode(LED)with different red/blue quality ratios on the growth of Dendrobium officinale plantlets in vitro[J]. J Northwest Sci-Tech Univ Agric For(Nat Sci Ed), 41(5): 155-159. [尚文倩，王政，侯甲男，等，2013. 不同红蓝光质比 LED 光源对铁皮石斛试管苗生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，41（5）：155-159.]

WANG JJ, TANG ZH, 2014. The regulation of soluble sugars in the growth and development of plants[J]. Bot Res, 3(3): 71-76. [王嘉佳，唐中华，2014. 可溶性糖对植物生长发育调控作用的研究进展[J]. 植物学研究，3（3）：71-76.]

WANG LF, LU YQ, DENG WJ, 2014. Effects of different light intensity on photosynthetic characteristics and ROS metabolism in light green leaves of rubber tree (*Hevea brasiliensis* Müll.Arg.)[J] Chin J Trop Crops, 35(6): 1131-1136. [王立丰，陆艳茜，邓玉杰，2014. 光照强度对巴西橡胶树淡绿期叶片光合特性和活性氧代谢的影响[J]. 热带作物学报，35（6）：1131-1136.]

WANG ZM, SONG FF, XU ZG, et al, 2011. Effect of red and blue LED light intensity on growth and quality of lettuce[J]. Chin Veg, 1(16): 44-49. [王志敏，宋非非，徐志刚，等，2011. 不同红蓝 LED 光照强度对叶用莴苣生长和品质的影响[J]. 中国蔬菜，1（16）：44-49.]

YAO XH, LONG W, CHEN F, et al, 2015. Effect of light quality on the growth of grafted seedlings in *Camellia oleifera* L.[J]. Chin Agric Bull, 31(34): 33-36. [姚小华，龙伟，陈芬，等，2015. 光质对油茶嫁接苗生长的影响[J]. 中国农学通报，31（34）：33-36.]

ZAVALA JA, RAVETTA DA, 2001. Allocation of photoassimilates to biomass, resin and carbohydrates in *Grindelia chiloensis* as affected by light intensity[J]. Field Crop Res, 69（2）：143-149.

ZHAN JC, HUANG WD, WANG JL, 2003. Research of weak light stress physiology in plants[J]. Chin Bull Bot, 20(1): 43-50. [战吉宬，黄卫东，王利军，2003. 植物弱光逆境生理研究综述[J]. 植物学报，20（1）：43-50.]

ZHONG PF, CHEN NL, 2008. Research progress of the influence of light intensity on photosynthesis of horticultural plants[J]. J Gansu Agric Univ, 43(5): 104-109. [种培芳，陈年来，2008. 光照强度对园艺植物光合作用影响的研究进展[J]. 甘肃农业大学学报，43（5）：104-109.]

ZHUANG RL, 2012. Camellia oleifera in China[M]. YAO XH, ZHOU QR. 2nd Ed. Beijing: China Forestry Publishing House: 1-10 [庄瑞林，2012. 中国油茶[M]. 姚小华，周启仁. 第二版. 北京：中国林业出版社：1-10.]